

УДК 621.3.048.81

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ И ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

С.С. Марьин, С.Н. Шуликин, И.Н. Шуликин

Томский политехнический университет

E-mail: mss\_tpu@mail.ru

*Исследованы возможные причины разрушения межвитковой изоляции с использованием образцов имитирующих обмотку низковольтных электрических машин. Установлено влияние вязкости пропиточных составов МЛ-92 и КО-916К на уровень внутренних механических напряжений и скорость образования дефектов в межвитковой изоляции низковольтных электрических машин.*

**Ключевые слова:**

*Пропиточный состав, эмальпровод, дефектообразование, внутренние механические напряжения.*

**Key words:**

*Impregnating composition, enameled wire, formation of defects, internal mechanical pressure.*

**Введение**

Надежность электротехнических устройств является необходимым условием эффективной работы различных автоматизированных систем, комплексов и оборудования, работающих в различных отраслях промышленности. Отказ большинства низковольтных электрических машин в процессе эксплуатации происходит в результате отказа системы изоляции обмоток [1].

Эксплуатационная надежность низковольтных систем электрической изоляции обмоток электрооборудования определяется в первую очередь их рабочей температурой и нагревостойкостью примененных электроизоляционных материалов, а также их электрической прочностью, влагостойкостью и механической прочностью.

Изменение свойств низковольтных систем электрической изоляции обмоток электрооборудования происходит под влиянием таких основных факторов как тепловые, электрические, механические нагрузки и воздействие окружающей среды [2–4]. Степень воздействия каждого из этих факторов на изоляционные системы различная. Наиболее слабым элементом системы изоляции электрической машины является витковая изоляция.

Выход из строя витковой изоляции обусловлен наличием в ней сквозных дефектов в пропиточном составе и эмалевой изоляции обмоточного провода, причем частота их появления возрастает по мере физического износа изоляции под действием эксплуатационных факторов. Следовательно, рост интенсивности отказов витковой изоляции обусловлен появлением в ней в процессе старения дефектов типа сквозных трещин, проходящих через пропиточный состав и два слоя эмалезоляции обмоточного провода двух соприкасающихся витков. Проблемой образования и роста трещины в полимерных материалах посвящено множество исследований, однако в них отсутствует информация о четкой взаимосвязи между изученными явлениями и реальной работой материалов в конкретном изделе.

**Материалы и методика эксперимента**

Для оценки скорости дефектообразования в межвитковой изоляции в качестве исследуемых материалов были выбраны обмоточные провода диаметром 1,0 мм с эмалевой изоляцией марок ПЭТВ и ПЭТМ-180, а также пропиточные составы марок МЛ-92 и КО-916К с различной вязкостью (выбор данных пропиточных составов обосновывается классами нагревостойкости выбранных обмоточных проводов и хорошей с ними совместимостью).

Выявление причин разрушения межвитковой изоляции и оценки скорости дефектообразования проводилось с помощью двух методов — консольным, для оценки внутренних механических напряжений возникающих в пленки пропиточного состава, и методом, описанном в ОСТ16.0.800.821-88 для оценки скорости дефектообразования.

Для оценки внутренних механических напряжений возникающих в пленках пропиточных составов применен консольный метод, основанный на измерении отклонения от первоначального положения свободного конца консольно закрепленной упругой металлической пластины с полимерным покрытием под влиянием внутренних напряжений в покрытии, чувствительность метода составляет около 0,03 МПа [6].

При выборе геометрии образцов и технологии их изготовления были приняты во внимание следующие основные требования: учет масштабного фактора; в реальных конструкциях толщина пропиточного и заливочного материала находится в пределах 0,03...0,1 мм; поэтому толщина образцов для испытаний принята равной 0,1 мм; учет технологического фактора; в первую очередь технология запечки пропиточного состава.

Металлическая подложка представляла собой следующую конструкцию: две пластины из нержавеющей стали 1X18H9T размером 0,08×0,015 м, толщиной 0,1 мм (пластина-подложка) и 1 мм (пластина-основание), соединенные точечной сваркой через стальную прокладку из нержавеющей стали размером 0,02×0,015 м, толщиной 1 мм.

В пластине-основании имелись четыре отверстия диаметром 10 мм для измерения толщины покрытия микрометром [7].

Для устранения статистической погрешности каждое измерение проводилось на пяти образцах. После сушки и в процессе теплового старения через интервалы времени в 100 ч образцы охлаждались до 20 °С. Возникающие в покрытии внутренние напряжения рассчитывались по величине отклонения свободного конца пластинки  $\Delta h$ :

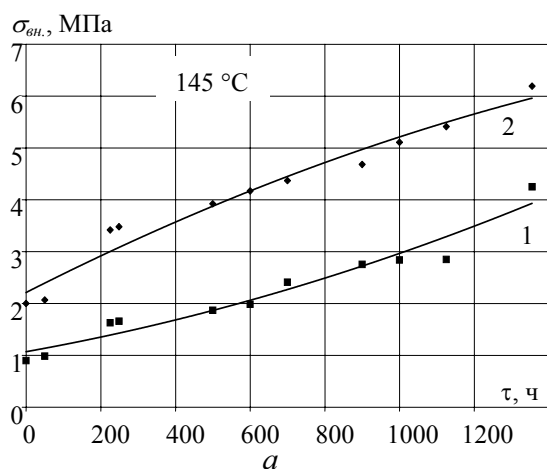
$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\Delta h E h_k^3}{3l^2 \Delta h_k (h_k + \Delta h_k)},$$

где  $\Delta h$  – отклонение пластины подложки от первоначального положения, м;  $E$  – модуль упругости пластины ( $E=1,96 \cdot 10^5$  МПа);  $l$ ,  $\Delta h_k$  – длина и толщина полимерного покрытия, м;  $h_k$  – толщина пластины-подложки, м.

Результаты измерений представлены на рис. 1.

Оценка скорости дефектообразования проводилась на образцах, имитирующих низковольтную межвитковую изоляцию намоточного изделия.

Образцы представляли собой макеты, изготовленные из 50-и попарно связанных отрезков бездефектного обмоточного провода длиной 330 мм. Макеты пропитывались составом с различной величиной условной вязкости от 19 до 40 с по ВЗ-4. Пропитка макетов проводилась двукратно методом погружения. Режим сушки проводился в соответствии с нормативно-технической документацией на пропиточные составы [5]. После сушки и в процессе теплового старения в термошкафах конвекционного типа через интервалы времени в 100 ч макеты вынимались, охлаждались до 20 °С и исследовались испытательным напряжением. При исследовании учитывалось количество пар, пробитых испытательным напряжением. Испытания проводились на следующих сочетаниях: провод ПЭТВ+МЛ-92, провод ПЭТМ-180+КО-916К. Результаты испытаний приведены в виде зависимостей скоростей дефектообразования  $H$  от времени старения, рис. 2.



## Результаты эксперимента

По результатам исследования внутренних механических напряжений в пропиточных составах установлено, что внутренние механические напряжения возникают в процессе отверждения составов. Кроме того, уровень этих напряжений постоянно растет с увеличением времени теплового старения. Этот процесс происходит за счет дополнительной сшивки макромолекул, непрореагировавших активных групп и двойных связей, а также структурирования, обусловленного термоокислительными процессами.

Плотность сшивки макромолекул возрастает, и усиливается физическое взаимодействие между межузловыми отрезками пространственной сетки. Все это приводит к повышению жесткости пропиточного состава и увеличению числа перенапряженных участков в объеме полимера.

С увеличением условной вязкости пропиточного состава внутренние механические напряжения также растут. Этот рост связан с уменьшением времени полимеризации пропиточного состава с большей вязкостью. При меньшей вязкости количество летучих веществ возрастает, следовательно, времени для их испарения требуется больше, а поскольку условия запечки для всех образцов одинаковы, то молекулярная структура полимера с меньшей вязкостью становится более упорядоченной, тем самым внутренние напряжения в такой структуре уменьшаются.

Чем выше начальная вязкость пропиточных составов, тем выше уровень внутренних механических напряжений, так как при большей вязкости, после отверждения остается больше сухого остатка, в объеме которого концентрируются данные напряжения.

На рис. 2 представлены зависимости изменения скорости дефектообразования от времени теплового старения для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов. Характер изменения скорости дефектообразования от времени старения и вязкости пропиточных со-

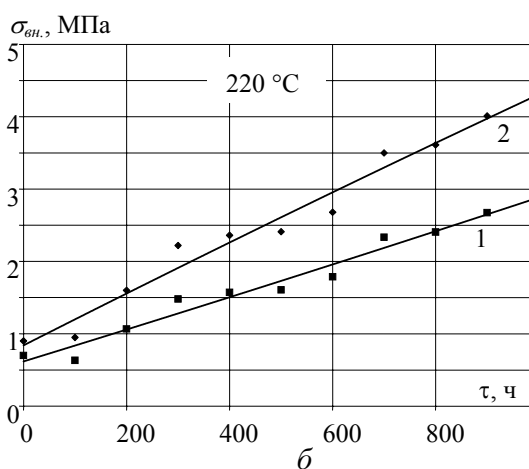


Рис. 1. Изменение величин внутренних механических напряжений в пленке пропиточного состава МЛ-92 (а) КО-916К (б) от времени теплового старения и условной вязкости пропиточного состава по ВЗ-4: 1) 19 с; 2) 40 с

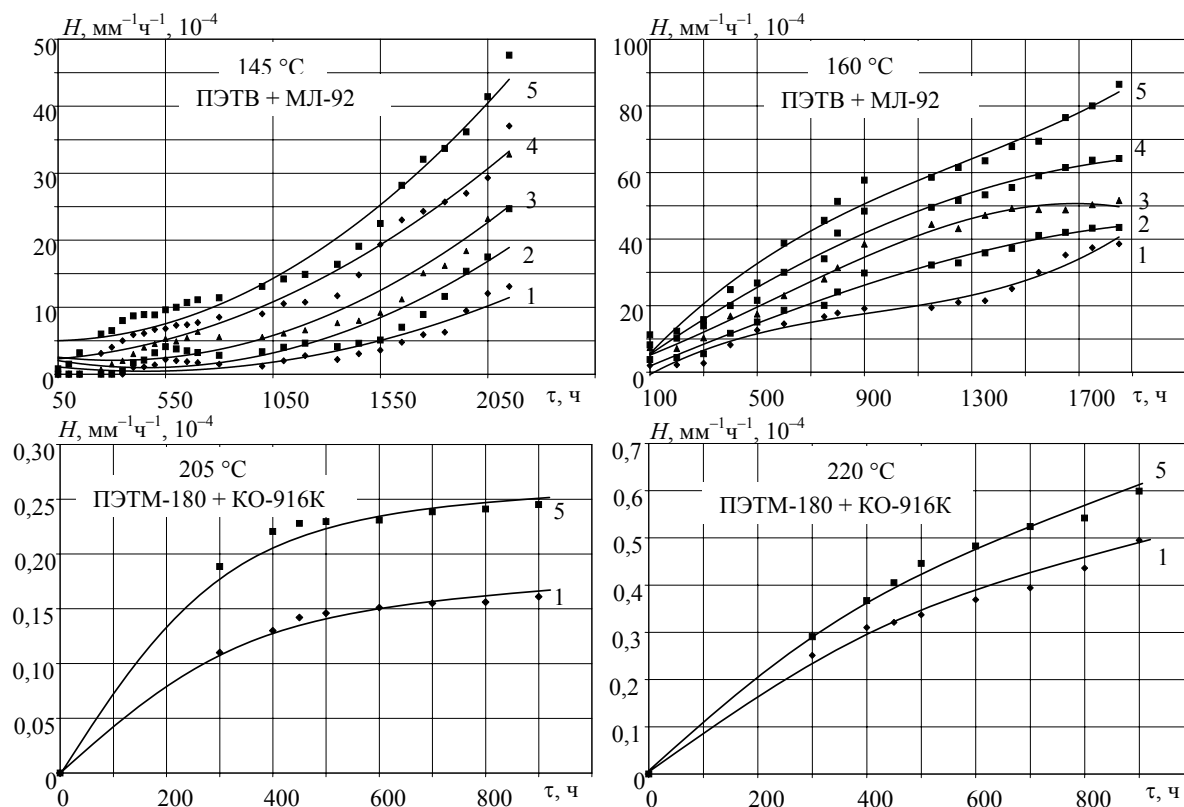


Рис. 2. Изменение скорости дефектообразования от времени теплового старения для изоляционных систем с различной условной вязкостью пропиточных составов по ВЗ-4: 1) 19, 2) 25, 3) 30, 4) 35, 5) 40 с

ставов для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов остается постоянным, т. е. с увеличением времени старения и вязкости пропиточного состава величина скорости дефектообразования так же увеличивается.

Процесс дефектообразования межвитковой изоляции начинается с растрескивания пропиточного состава под действием внутренних механических напряжений в его объеме, величина которых главным образом зависит от разницы в физико-механических параметрах (модуля упругости, температурного коэффициента линейного расширения, адгезии) между ее компонентами.

Наибольшей скоростью дефектообразования среди исследованных композиций отмечено в системе ПЭТВ+МЛ-92. Для этого сочетания характерен высокий уровень внутренних механических напряжений.

При пропитке обмоточных проводов кремнийорганическим составом КО-916К отмечено меньшее количество отказов. В этом пропиточном составе меньшая величина внутренних механических напряжений по сравнению с меламинаформальдегидным составом.

При увеличении условной вязкости пропиточных составов ускоряются процессы дефектообразования, т. к. уровень внутренних механических напряжений также увеличивается.

Изменение условной вязкости пропиточных составов с 19 до 40 с по ВЗ-4 для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов увеличивает величину скорости дефектообразования. Это связано с низким уровнем внутренних механических напряжений в составах с меньшей вязкостью.

На основании данных, рис. 1, в диапазоне температур 20...145 °C определена энергия активации процесса образования внутренних механических напряжений для пропиточного состава МЛ-92, равная 0,35 эВ. Для процесса дефектообразования, рис. 2, эта величина не превышает 0,42 эВ. Близкие значения энергий активации подтверждают положение об ответственности внутренних механических напряжений за образование трещин, и в итоге, за потерю электрической прочности изоляции. Эти результаты подтверждают взаимосвязь электрической и механической стойкости полимерных материалов, применяемых в межвитковой изоляции низковольтных электрических машин.

#### Выводы

1. При исследовании обмоток низковольтных электрических машин установлено, что внутренние механические напряжения в их пропиточных составах возникают в процессе отвер-

ждения. Уровень этих напряжений зависит от температуры, времени теплового старения и вязкости пропиточных составов.

2. Установлено, что характер изменения скорости дефектообразования от времени старения и вязкости пропиточных составов для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов остается неизменным.

Изменение вязкости пропиточных составов для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов увеличивает скорость дефектообразования.

3. Электрическая прочность межвитковой изоляции зависит от уровня внутренних механических напряжений, возникающих в пропиточном составе после отверждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. — М.: Энергоиздат, 1981. — 376 с.
2. Dudkin A.N., Maryin S.S., Leonov A.P. Through defect development in interterm insulation of low voltage windings of electric machines // Proc. of the 6<sup>th</sup> Intern. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-graduates and Young Scientists. — Tomsk, 2001. — P. 122–124.
3. Похолков Ю.П. Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей: Дис. ... докт. техн. наук. — Томск, 1977. — 482 с.
4. Pokholkov Yu.P., Dudkin A.N., Maryin S.S., Leonov A.P. Estimation of reliability of the system insulation of low-voltage electric

machines at a stage of designing, manufacture and while in service // Proc. of the 5<sup>th</sup> Korea-Russia Intern. Symp. on Science and technology. — Tomsk, 2001. — V. 2. — P. 282–283.

5. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин. — М.: Энергоиздат, 1993. — 592 с.
6. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г. Надежность изоляции электрических машин. — М.: Энергия, 1979. — 176 с.
7. Дудкин А.Н., Ким В.С., Марьин С.С. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 171–174.

Поступила 24.11.2010 г.

УДК 621.3.048.81

## МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С.С. Марьин, С.Н. Шуликин, И.Н. Шуликин

Томский политехнический университет  
E-mail: mss\_tpu@mail.ru

Установлена зависимость пробивного напряжения межвитковой изоляции от механической прочности изоляционных материалов. Показано, что избыточное появление трещин в межвитковой изоляции является причиной потери материалом изоляционных свойств. На основе теории прочности твердых тел создан метод расчета долговечности низковольтной межвитковой изоляции.

### Ключевые слова:

Эмальпровод, дефектообразование, вероятность безотказной работы.

### Key words:

Enameled wire, formation of defects, reliabilities.

Оценка показателей надежности и долговечности низковольтной межвитковой изоляции электротехнических устройств в современных условиях осуществляется путем сравнения параметров внешних воздействий (электрическое напряжение, температура) и электрической прочности материала изоляции. Принято считать, что выход из строя электротехнических устройств происходит при превышении величины коммутационных перенапряжений межвитковой изоляции, а причиной этого является образование сквозных дефектов (трещин) в изоляционной структуре [1–3].

На основании изложенного разработан новый метод диагностики низковольтной межвитковой изоляции электротехнических устройств.

В основе предлагаемого метода определения долговечности лежит идея о взаимосвязи трещино-

образования и электрической прочности полимерных структур. Другими словами, электрическая прочность материала определяется его механической прочностью.

В работе выполнены эксперименты, свидетельствующие о том, что напряжение пробоя межвитковой изоляции уменьшается с ростом скорости дефектообразования.

Для экспериментов были выбраны три партии обмоточных проводов диаметром 1,0 мм марок ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭТМ-180. Изготовлено по 50 отрезков провода длиной 200 мм с искусственно нанесенным дефектом (сквозной кольцевой порез эмальслоя обмоточного провода) и по 50 образцов длиной 200 мм без искусственных повреждений эмальслоя. Поочередно каждый образец обмоточного провода подвергали воздействию повышен-